



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑪ Aktenzeichen: P 43 04 815.3
⑫ Anmeldetag: 17. 2. 93
⑬ Offenlegungstag: 18. 8. 94

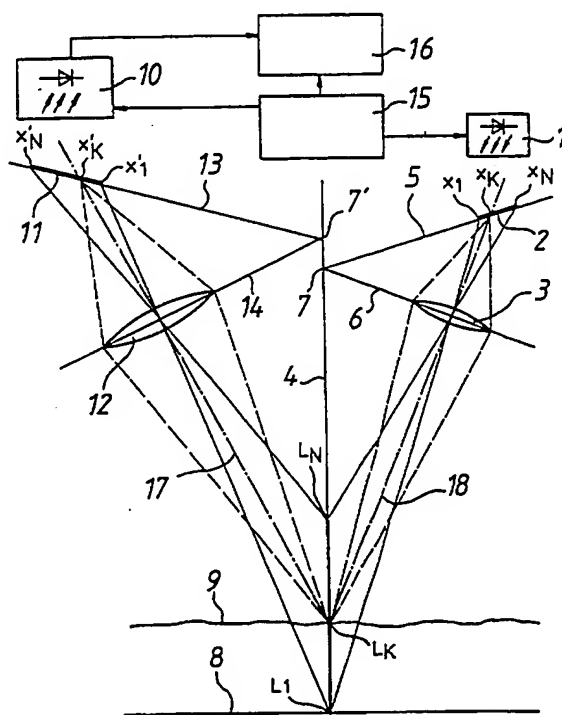
DE 43 04 815 A 1

⑦ Anmelder:
Leitz Meßtechnik GmbH, 35578 Wetzlar, DE

⑧ Erfinder:
Ricklefs, Ubbo, Prof. Dr., 6349 Greifenstein, DE

⑤ Optischer Sensor

⑥ Optischer Sensor zur Vermessung von Objekt-Höhenprofilen mit einer Lichtquelle aus einer Vielzahl in einer Ebene angeordneter Leuchtpunkte. Für die Abbildung dieser Lichtquelle in eine senkrecht zur Objektoberfläche stehende Bildebene gilt die Scheimpflug-Bedingung. Die Abbildung des Reflexlichtes geschieht ebenfalls unter Einhaltung der Scheimpflug-Bedingung. Als Lichtquelle wird vorzugsweise eine Leuchtdioden-Zeile verwendet, deren Dioden zur Antastung der Objektoberfläche nacheinander geschaltet werden.



DE 43 04 815 A 1

Die Erfindung betrifft einen optischen Sensor zur Vermessung von Objekt-Höhenprofilen mit einem Beleuchtungsstrahlengang zur Abbildung einer Lichtquelle auf eine Objektoberfläche und einem Beobachtungsstrahlengang zur Abbildung der von der Objektoberfläche reflektierten Lichtstrahlen auf eine Empfangseinrichtung, wobei die Empfangseinrichtung aus einem ebenen Detektor und einer Abbildungsoptik besteht, deren Hauptebene sich mit der Detektorebene und einer die zu vermessende Profilhöhe enthaltenden Ebene entsprechend der Scheimpflug-Bedingung in einer Geraden schneidet.

Die Abbildungsoptik wird im Zusammenhang mit dem Erfindungsgegenstand vereinfachend als dünne Linse angenommen, deren Hauptebene mit ihrer Mittelebene zusammenfällt. Es liegt im Rahmen fachmännischen Handelns, bei einer realen Abbildungsoptik die der Scheimpflug-Bedingung entsprechenden bild- bzw. objektseitigen Hauptebenen zu bestimmen.

Ein Sensor dieser Art mit Triangulationsauswertung ist aus der DE-PS 33 02 948 bekannt. Als Lichtquelle wird ein kollimierter He-Ne-Laser verwendet, dessen Strahlrichtung senkrecht zur Objektoberfläche steht. Das vom Laser abgestrahlte Licht erzeugt auf der anzu-messenden Objektoberfläche einen Lichtpunkt. Das aus diesem Lichtpunkt diffus gestreute Licht wird auf einen positionsempfindlichen Detektor abgebildet und beleuchtet dort ein oder mehrere Bildaufnahmeelemente. Bei unterschiedlichen Entfernungen des streuenden Lichtpunktes von der Lichtquelle wird dieser an unterschiedlichen Orten auf dem Bildaufnehmer abgebildet. Die Beziehung zwischen der Abstandsänderung entlang der Strahlrichtung des Lasers und der Lageveränderung der Abbildung auf dem Bildaufnehmer ist trigonometrisch eindeutig bestimmbar und ergibt die aktuelle Profilhöhe. Durch die Einhaltung der Scheimpflug-Bedingung wird erreicht, daß jeder Gegenstand entlang der optischen Achse des Lasers scharf auf die Ebene des Bildaufnehmers abgebildet wird. Das gilt insbesondere für jeden vom Laser entlang seiner Strahlrichtung erzeugten Lichtpunkt, wodurch eine höhere Auflösung des Meßverfahrens erreicht wird.

Die Auflösung wird begrenzt durch den Durchmesser des kollimierten Laserstrahls. In der Praxis läßt sich dieser nicht beliebig stark bündeln, und der Strahldurchmesser ist längs der Strahlachse auch nicht konstant, so daß die Abstandsmessung in Abhängigkeit von dem jeweiligen Lichtpunktdurchmesser mit unterschiedlichen Fehlern behaftet ist.

Die Ausrichtung des Beobachtungsstrahlengangs entsprechend der Scheimpflug-Bedingung bedeutet eine Erweiterung des Schärfentiefen-Bereiches für die Abbildung in diesem Zweig des Sensors. Aus der DE-PS 33 37 251 ist zu entnehmen, daß eine zusätzliche Steigerung des Auflösungsvermögens erreicht werden kann, wenn auch im Beleuchtungsstrahlengang der Schärfentiefe-Bereich erweitert wird. Dazu wird vorgeschlagen, die Lichtquelle mit Hilfe einer Axicons, also einer kegelförmigen Linse, auf die Objektoberfläche abzubilden. Das Axicon erzeugt durch Interferenzen längs der optischen Achse eine enge Lichtverteilung, deren Durchmesser das Auflösungsvermögen bestimmt. Die Ausdehnung der engen Lichtverteilung entlang der optischen Achse entspricht der wirksamen Schärfentiefe-Erweiterung. Über diesen Bereich ist eine genauere Profilhöhenbestimmung möglich.

Die Herstellung eines solchen Axicons ist äußerst aufwendig. Der theoretisch erreichbare Strahldurchmesser läßt sich in der Praxis kaum erzielen. Auch die tatsächlich realisierbare Schärfentiefe-Ausdehnung ist durch die erforderlichen optischen Abbildungsmittel begrenzt.

Der Erfindung lag daher die Aufgabe zugrunde, einen optischen Sensor mit weiter verbesserter Meßgenauigkeit, erweiterten Meßmöglichkeiten und technisch besser beherrschbaren und einfacheren Bauelementen zu schaffen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Lichtquelle aus einer Vielzahl in einer Ebene angeordneter Leuchtpunkte besteht, wobei die Leuchtpunkteebene und die Hauptebene der zugeordneten Abbildungsoptik in Bezug auf die die zu vermessende Profilhöhe enthaltende Ebene ebenfalls entsprechend der Scheimpflug-Bedingung ausgerichtet sind und sich in einer Geraden schneiden. Von Vorteil ist es, wenn die Leuchtpunkte eine Zeile bilden, deren Richtung senkrecht auf der dem Beleuchtungsstrahlengang zugehörigen Schnittgeraden steht. Die Leuchtpunkte können aber auch eine nach Zeilen und Spalten ausgerichtete Matrix bilden, deren Zeilenrichtung senkrecht und deren Spaltenrichtung parallel zu der dem Beleuchtungsstrahlengang zugehörigen Schnittgeraden ist. Zur Darstellung der Leuchtpunkte eignen sich insbesondere Leuchtdioden und Laserdioden. Die Emission der einzelnen Leuchtpunkte kann mit einer Kennung versehen sein, wobei eine Kennung nach dem Polarisationszustand, der Wellenlänge oder einer Frequenzmodulation vorteilhaft ist. Besondere Meßmöglichkeiten ergeben sich, wenn die Leuchtpunkte unabhängig voneinander einschaltbar sind. Die eine Spalte bildenden Leuchtpunkte können auch gemeinschaftlich einschaltbar sein. Eine Erweiterung der Auswertungsmöglichkeiten ergibt sich durch die Verwendung eines positionsempfindlichen Detektors.

In einer Weiterbildung der Erfindung ist eine Steuerung zur positionsabhängigen Einschaltung der einzelnen Leuchtpunkte und der Aufnahme des jeweils zugeordneten Detektorsignals, sowie eine Auswerteschaltung zur Ermittlung des maximalen Detektorsignals und der zugehörigen Lage des Leuchtpunktes vorgesehen.

Die Auswerteschaltung kann zusätzlich so ausgebildet sein, daß sie zum maximalen Detektorsignal auch die Position des Lichtschwerpunktes auf dem Detektor ermittelt. Da für jeden Leuchtpunkt bekannt ist, an welcher Stelle der Lichtschwerpunkt auf dem Detektor liegt, wenn die Fokusbedingung erfüllt ist, kann so auf den Abstand vom Fokus geschlossen werden.

In der Zeichnung ist ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Sensors schematisch dargestellt und wird anhand dieser Darstellung nachfolgend näher beschrieben. Im einzelnen zeigt:

Fig. 1 den optischen Aufbau im Schnitt und
Fig. 2 eine Aufsicht.

Die Lichtquelle 1 besteht aus einer Leuchtdioden-Zeile 2 mit z. B. 256 Elementen. Es kann jedoch auch eine Laserdioden-Zeile oder ein zeilenförmig angeordnetes Lichtleitbündel verwendet werden. Diese Zeile wird durch eine Abbildungsoptik 3 in die Bildebene 4 abgebildet. Die Ebene 5, in der die Leuchtdioden-Zeile 2 liegt, und die Hauptebene 6 der Abbildungsoptik 3 sind dabei entsprechend der Scheimpflug-Bedingung so zueinander ausgerichtet, daß sie sich in einer senkrecht zur Zeichenebene stehenden Geraden 7 schneiden. Die Bildebene 4 steht senkrecht auf einer Referenzebene 8,

so daß in ihr die zu bestimmende Profilhöhe PH einer Objektoberfläche 9 in Bezug auf die Referenzebene 8 liegt. Die Leuchtdioden-Zeile 2 ist senkrecht auf der Geraden 7. Ihr Bild hat daher die Richtung der Profilhöhe PH. Bei Verwendung einer nach Zeilen und Spalten ausgerichteten Leuchtpunkte-Matrix liegt das Bild der Spalten ebenfalls in der Ebene 4. Die Richtung der Spalten-Bildpunkte steht aber senkrecht auf der Zeichenebene, wenn die Spalten der Leuchtpunkte-Matrix parallel zur Geraden 7 ausgerichtet sind.

Im dargestellten Beispiel wird nur das Element K der Leuchtdioden-Zeile 2 durch die Abbildungsoptik 3 als Lichtpunkt L_K auf die Objektoberfläche 9 scharf abgebildet. Da die Apertur der Abbildungsoptik 3 der Abstrahlcharakteristik der einzelnen Leuchtdiodenelemente angepaßt werden kann, enthält der Lichtpunkt L_K eine hohe Lichtintensität. Alle übrigen Leuchtdiodenelemente erscheinen in dieser Stellung auf der Objektoberfläche versetzt und diffus. Die für den Lichtpunkt L_K beschriebenen Abbildungsverhältnisse gelten bei Betrachtung einer anderen Profilhöhe in gleicher Weise für alle anderen Leuchtdiodenelemente, so daß der wirksame Schärfentiefebereich allein durch die lineare Ausdehnung x_1 bis x_N der Vielzahl der Leuchtpunkte $K = 1$ bis N und den Abbildungsmaßstab der Abbildungsoptik 3 bestimmt wird. Im dargestellten Beispiel erstreckt er sich über den Bereich der Lichtpunkte L_1 bis L_N .

Der Beobachtungsstrahlengang enthält einen ebenen Detektor 10, der insbesondere auch positionsempfindlich sein kann. Bekannt sind analoge Detektoren, mit denen die Lage des Intensitätsschwerpunktes der auf treffenden Lichtstrahlen in der Detektorebene ermittelt werden kann. Im dargestellten Beispiel wird ein digitaler Detektor verwendet, der aus einer Fotodioden-Zeile 11 besteht. Eine Abbildungsoptik 12 bildet das diffus an der Objektoberfläche 9 gestreute Licht auf diese Fotodioden-Zeile 11 ab. Die Detektorebene 13 und die Hauptebene 14 der Abbildungsoptik 12 sind zur Bildebene 4 so ausgerichtet, daß sie die Scheimpflug-Bedingung erfüllen und sich in einer Geraden 7' schneiden, die vorzugsweise parallel zur entsprechenden Gerade 7 des Beleuchtungsstrahlenganges verläuft. Die Apertur und der Abbildungsmaßstab der Abbildungsoptik 12 können entsprechend der Streucharakteristik der Lichtpunkte L_K an der Objektoberfläche 9 und der Ausdehnung x'_1 bis x'_N des Detektors 11 gewählt werden.

Aus Fertigungs- und Kostengründen können jedoch auch die Abbildungsoptiken 3 und 12 übereinstimmend sein. Dadurch ergibt sich ein symmetrischer Aufbau des Beleuchtungs- und Beobachtungsstrahlenganges mit übereinstimmender Schnittgeraden der Ebenen, so daß die gerichtete Reflexion an der Objektoberfläche genutzt werden kann und höhere Detektorsignale zur Verfügung stehen. Im Vergleich zu bekannten Anordnungen mit senkrechter Lichteinstrahlung entstehen außerdem bei gleicher Basislänge zwischen Lichtquelle und Detektor deutlich weniger Abschattungsprobleme für das z. B. an Vertiefungen reflektierte Licht.

Bei den bekannten Sensoren, die ausschließlich eine punktförmige Lichtquelle verwenden, führt schräge Einstrahlung zwangsläufig dazu, daß die Höheninformation nicht senkrecht zur Objektoberfläche bestimmt werden kann. Wird der Abstand zur Objektoberfläche verändert, so wird auch an einer anderen Stelle auf der Objektoberfläche gemessen. Beim erfindungsgemäßen Sensor wird dagegen die ausgedehnte, aus vielen Leuchtelementen bestehende Lichtquelle bei schräger

Einstrahlung so abgebildet, daß bei verändertem Abstand zur Objektoberfläche an derselben Stelle automatisch ein anderes Leuchtelement scharf abgebildet wird.

Die grundlegende Idee der Erfindung liegt darin, daß in der Bildebene 4 bei schräger Einstrahlung ein scharf gebündeltes, gleichförmiges Lichtband aus aneinandergereihten Lichtpunkten erzeugt wird. Dabei dient ein übliches Linsensystem zur Abbildung der Lichtquelle, das kostengünstig auch mit geringen Fertigungstoleranzen herstellbar ist. Die Lichtquelle kann für diesen Zweck grundsätzlich auch als beleuchteter Spalt mit geometrisch nicht mehr voneinander trennbaren Leuchtelementen ausgebildet werden. Bei Verwendung einer Leuchtpunkte-Matrix entsteht entsprechend eine dünne Lichtpunkte-Scheibe. Bei Einschaltung einzelner Spalten der Matrix entstehen Lichtpunkte-Bänder parallel zur Richtung der Geraden 7, 7'.

Die Anordnung ermöglicht unterschiedliche Auswertungsverfahren zur Ermittlung der Profilhöhe. Alle Verfahren nutzen die Eigenschaft des erfindungsgemäßen Sensors, nahezu senkrecht zur Objektoberfläche 9 ein gleichförmig scharfes Lichtband zwischen den Lichtpunkten L_1 und L_N zu erzeugen. Im aktuellen Durchstoßpunkt des Lichtbandes durch die Objektoberfläche 9 entsteht ein besonders intensiver Lichtpunkt L_K , dessen Abbildung auf dem Detektor 11 an einer bestimmten Stelle x'_K ein maximales Signal erzeugt. Aus dem bekannten Abstand der Stelle x'_K von der Geraden 7', den durch die Konstruktion ebenfalls bekannten Winkeln zwischen den Ebenen 13, 14, 4 und dem Abstand der optischen Achse 17 der Abbildungsoptik 12 zur Geraden 7' läßt sich in üblicher Weise der Abstand der Geraden 7 zur Objektoberfläche 9 bzw. die Profilhöhe PH gegenüber der Referenzebene 8 bestimmen. Insofern ist das Verfahren nicht neu. Es hat jedoch den Vorteil höherer Meßgenauigkeit wegen des genauer definierten Lichtbandes.

Neue Meßmöglichkeiten ergeben sich bei Verwendung einer Leuchtdioden- oder Laserdioden-Zeile mit unabhängig voneinander einschaltbaren Leuchtelementen als Lichtquelle. Bei dieser können mit Hilfe einer Steuerschaltung 15 nacheinander die einzelnen Elemente $K = 1$ bis N zum Leuchten angesteuert werden. Nur für ein bestimmtes Leuchtelement K wird das Detektorsignal maximal, da nur dieses Element optimal auf die Objektoberfläche abgebildet wird und ein maximales Streulichtbündel erzeugt. Der Detektor braucht lediglich die Lichtintensität zu messen. Eine Information über die Lage des Lichtschwerpunktes ist nicht erforderlich. Die Steuerschaltung 15 korreliert das jeweilige Detektorsignal mit dem jeweils eingeschalteten Leuchtelement, so daß die Auswerteschaltung 16 den Maximalwert dem bestimmten Leuchtelement K zuordnen kann. Anstatt immer nur ein Leuchtelement einzuschalten, kann die Zuordnung des Detektorsignals zu einem Leuchtelement auch durch den Leuchtpunkten eingeprägte Eigenschaften, wie etwa Polarisation, Wellenlänge oder Modulationsfrequenz realisiert werden, wobei der Detektor für die jeweilige Kennung des Lichts empfindlich ist.

Der Kontrast im Detektorsignal kann noch verbessert werden, wenn vor dem Detektor 10 eine an die Abbildung durch die Abbildungsoptik 12 angepaßte Schlitzblende angeordnet wird. Die Abstandsinformation wird aus dem Abstand x_K des durch Auswertung des Detektorsignals ermittelten Leuchtelementes K zur Geraden 7, den bekannten Winkeln zwischen den Ebe-

nen 5, 6, 4, sowie dem Abstand der optischen Achse 18 der Abbildungsoptik 3 von der Geraden 7 berechnet. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, daß dem Meßsignal des Lichtpunktes L_K kein Streulichtintergrund aus der unscharfen Abbildung der anderen Leuchtelemente überlagert ist.

Zur Aufnahme eines Höhenprofils der Objektoberfläche 9 genügt es, die neben dem Element K liegenden Leuchtelemente im Wechsel anzuschalten und die Veränderung des Detektorsignals zu beobachten. Die Anordnung ermöglicht damit eine direkte Höhenabtastung ohne mechanisch bewegte Elemente und über einen vorwählbaren, der jeweiligen Meßaufgabe angepaßten Abtastbereich.

Die Meßgenauigkeit läßt sich wesentlich steigern, wenn man die mit den vorgenannten Verfahren gewinnbaren Informationen miteinander kombiniert. Nutzt man sowohl die Kenntnis aus, daß das Signal des Lichtpunktes L_K für das Leuchtelement K und damit für dessen Lage x_K maximal wird, als auch die Kenntnis, daß das maximale Signal i_K auf dem Detektor seinen Schwerpunkt an der Stelle x'_K hat, so kann man die Funktion $f_K = i_K / (x_K - x'_K)$ bilden und das Element K suchen, für das diese Funktion maximal wird. Da im Antastpunkt der Zähler groß ist und der Nenner gegen Null geht, gibt diese Funktion ein sehr empfindliches Meßkriterium.

Die Verwendung einer nach Zeilen und Spalten geordneten Leuchtpunkte-Matrix bietet den besonderen Vorteil, daß das Höhenprofil der Objektoberfläche 9 zusätzlich in Richtung senkrecht zur Zeichenebene abgetastet werden kann. Dies ist in Fig. 2 dargestellt.

Fig. 2 zeigt in einer Aufsicht die Lichtquelle 1, den Detektor 10 und die sich aus der Scheimpflug-Bedingung ergebenden, übereinander liegenden Schnittgeraden 7, 7' in der Ebene 4. Die Lichtquelle sei eine nach Zeilen und Spalten ausgerichtete Leuchtdiodenmatrix. Der Detektor sei eine CCD-Kamera mit gleicher Ausrichtung der Empfangselemente. Die Spaltenrichtung der Leuchtpunkte x_K soll durch den Spalt 19 dargestellt werden. Der Spalt 19 wandert in X-Richtung durch entsprechend gesteuerte Einschaltung der Leuchtpunkte x_K . Ein entsprechendes Lichtband wandert dadurch in der Ebene 4 auf und ab und wird je nach Ausbildung des Profils der Objektoberfläche 9 an dieser reflektiert. Das der Stellung des Spaltes 19 entsprechende Bild der Lichtquelle auf dem Detektor 10 ist dort schraffiert dargestellt. Die Detektorfläche wird für jede Leuchtpunktespalte abgetastet, um die Zeile maximaler Helligkeit herauszufiltern. Dazu ist ein Spalt 20 dargestellt, der sich in Zeilenrichtung erstreckt und dessen Abtastbewegung in Y-Richtung angedeutet ist. In dem dargestellten Beispiel liegt eine scharfe Abbildung nur am oberen Rand der Detektorfläche vor. Das dort liegende CCD-Element gibt also ein maximales Signal ab.

Patentansprüche

1. Optischer Sensor zur Vermessung von Objekt-Höhenprofilen mit einem Beleuchtungsstrahlengang zur Abbildung einer Lichtquelle auf eine Objektoberfläche und einem Beobachtungsstrahlengang zur Abbildung der von der Objektoberfläche reflektierten Lichtstrahlen auf eine Empfangseinrichtung, wobei die Empfangseinrichtung aus einem ebenen Detektor und einer Abbildungsoptik besteht, deren Hauptebene sich mit der Detektor-

ebene und einer die zu vermessende Profilhöhe enthaltenden Ebene entsprechend der Scheimpflug-Bedingung in der Geraden schneidet, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle (1) aus einer Vielzahl in einer Ebene angeordneter Leuchtpunkte (2) besteht, wobei die Leuchtpunktebene (5) und die Hauptebene (6) der zugeordneten Abbildungsoptik (3) in Bezug auf die die zu vermessende Profilhöhe PH enthaltende Ebene (4) ebenfalls entsprechend der Scheimpflug-Bedingung ausgerichtet sind und sich in einer Geraden (7) schneiden.

2. Optischer Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Leuchtpunkte (2) eine Zeile bilden, deren Richtung senkrecht auf der dem Beleuchtungsstrahlengang (18) zugehörigen Schnittgeraden (7) steht.

3. Optischer Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Leuchtpunkte (2) eine nach Zeilen und Spalten ausgerichtete Matrix bilden, deren Zeilenrichtung senkrecht und deren Spaltenrichtung parallel zu der dem Beleuchtungsstrahlengang (18) zugehörigen Schnittgeraden (7) ist.

4. Optischer Sensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Leuchtpunkte durch Leuchtdioden oder Laserdioden gebildet werden.

5. Optischer Sensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Emission der einzelnen Leuchtpunkte (2) mit einer Kennung versehen ist.

6. Optischer Sensor nach Anspruch (5), dadurch gekennzeichnet, daß die Emission jeweils einen definierten Polarisationszustand hat.

7. Optischer Sensor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Emission jeweils eine unterschiedliche Wellenlänge hat.

8. Optischer Sensor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Emission unterschiedlich frequenzmoduliert ist.

9. Optischer Sensor nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Leuchtpunkte unabhängig voneinander einschaltbar sind.

10. Optischer Sensor nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die eine Spalte bildenden Leuchtpunkte gemeinschaftlich einschaltbar sind.

11. Optischer Sensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein positionsempfindlicher Detektor vorgesehen ist.

12. Optischer Sensor nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch eine Steuerschaltung (15) zur positionsabhängigen Einschaltung der einzelnen Leuchtpunkte und der Aufnahme sowie eine Auswerteschaltung (16) zur Ermittlung des maximalen Detektorsignals, des jeweils zugeordneten Detektorsignals und der zugehörigen Lage des Leuchtpunktes.

13. Optischer Sensor nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerteschaltung zum maximalen Detektorsignal auch die Position des Lichtschwerpunktes auf dem Detektor ermittelt.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

Fig. 1

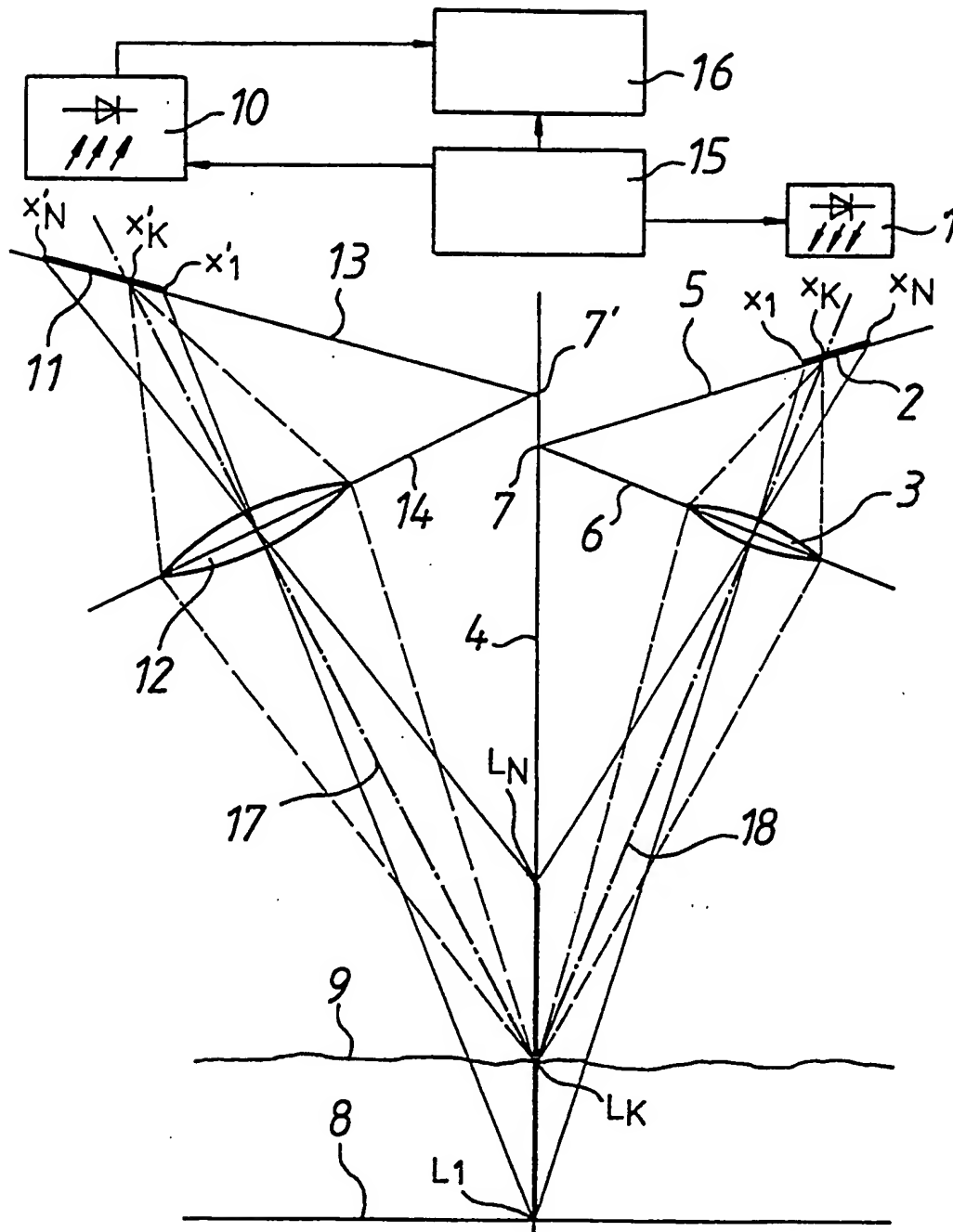


Fig. 2

